

연료전지용 3상 전류형 능동 클램프형 DC-DC 컨버터 구현 및 실험

차한주, 강태섭, 김우중, 최정완  
충남대학교 전기공학과

Implementation and experiment of Three-Phase Current-fed DC/DC Converter with Active Clamp for Fuel Cells

Hanju Cha, Taesub Kang, Woojung Kim, Jungwan Choi  
Department of Electrical Engineering, Chungnam National University

**Abstract** - 본 논문에서는 큰 부하 변동에도 안정된 동작이 가능한 연료전지용 3상 전류형 능동 클램프 DC-DC 컨버터를 구현하였다. 무부하에서 부하변동에 따른 안정적인 출력 전압을 얻기 위해 연료전지용 3상 전류형 능동 클램프 DC/DC 컨버터에 플라이백 방식으로 입력 인덕터 2차측에 권선을 감아 출력 전압을 확립하였다. 고부하에서의 동작이 적합하도록 입력 인덕터를 교체해 기존 컨버터의 한계용량을 개선시켰다. 실험을 통해 낮은 직류 출력 전압에서 높은 직류 출력 전압으로의 변환 시 무부하에서 부하 증가에 따른 안정적인 동작상태를 확인하였으며 출력전압 및 온도, 효율을 분석 하였다.

1. 서 론

최근 환경파괴와 지구온난화에 따른 기후변화, 자원 고갈에 대한 문제들이 대두 되면서 기존의 에너지를 대체 할 수 있는 신재생에너지가 큰 관심을 받고 있다. 그 중 연료전지는 DC 30V~60V의 낮은 직류 출력 전압을 가지고 있어 계통 연계시 DC 370V로 변환해 주어야 하며 DC/DC컨버터가 사용된다. DC/DC 컨버터 중 컨버터의 정격을 증가시킬 수 있는 3상 컨버터에 대한 연구가 활발히 진행 중에 있다. 3상 컨버터 중에서 3상 전류형 능동 클램프 DC/DC 컨버터의 경우, 과전류, 단락사고에 의한 보호에 대한 장점이 있지만, 정상상태로 운전 하려면 입력전압보다 큰 출력전압이 확립되어야 한다. 따라서 본 논문에서는 3상 전류형 능동 클램프 DC/DC 컨버터에 플라이백 방식으로 입력 인덕터 2차측에 권선을 감아 출력전압을 확립하여 무부하에서 부하 증가함에 따라 나타나는 출력전압 및 온도, 효율에 대해 분석하였으며 정상상태에서 출력전압과 입력 전류를 일정하게 제어하는 제어기를 제안하였다.

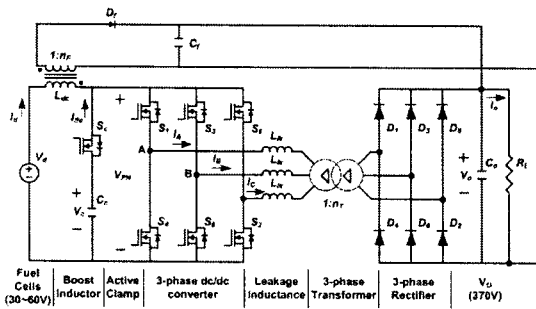


그림1. 기동 권선을 가진 3상 능동 클램프 전류형 DC/DC 컨버터

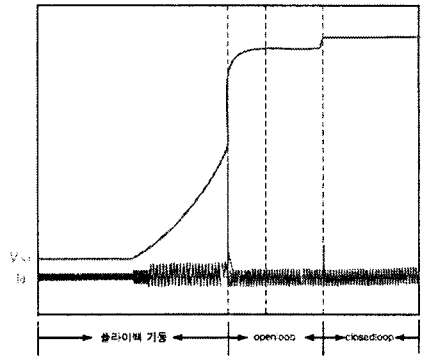
2. 기동방법

기동 시 3상 전류형 능동 클램프 DC/DC 컨버터는 능동 클램프 플라이백 컨버터로 동작한다. 스위치 6개가 온 되면 입력 인덕터에 전류가 흐르면서 에너지가 저장 되고, 스위치 6개가 모두 꺼지면 클램프 스위치가 켜져 입력 인덕터의 2차 권선에 전류가 흘러 출력 측으로 에너지가 전달된다. 듀티와 출력 전압의 관계식은 다음과 같으며 D는 듀티비,  $n_F$ 는 입력 인덕터의 1-2차간 권선비이다[1].

$$V_o = \frac{D}{1-D} n_F V_d \quad (1)$$

6개의 스위치  $S_1 \sim S_6$ 에 가해지는 전압은 클램프 전압과 같으며 다음 관계식으로 유도할 수 있다.

$$V_c = \frac{1}{1-D} V_d \quad (2)$$



	flyback기동	openloop	closedloop
Duty	0 ~ 60%	60% ~ 45%	45% ~ 44%
Vo	0 ~ 250V	250V ~ 380V	382V

그림2. 무부하일 때 flyback 방식으로 기동 후 모드변화 동작 순간파형과 모드별 duty와 출력전압 표.

그림2는 플라이백으로 기동 후 모드 변화 순간을 나타내는 파형이다. 입력전압 인가 시 입력인덕터에 의해 출력전압은 서서히 증가하다가 open loop모드로 전환하여 스위칭에 의해 출력전압이 완전히 확립되고 closed loop 모드로 넘어가 기존 출력 전압으로 제어 되는 동작을 확인할 수 있다. 동작 과정을 분석해 보면 기동 시 듀티가 0에서 0.5로 증가하게 되면 출력전압은 다음과 같다.

$$V_o = n_F V_d \quad (3)$$

6개의 스위치가 모두 온 되는  $DT_S$ 구간에서 입력 인덕터에 에너지가 충전되고 3개의 스위치가 오프되고 나머지 3개의 스위치가 온 되는  $(1-D)T_S$ 구간에서 3상 변압기와 3상 정류기를 거쳐 출력 측으로 에너지가 전달된

다. 능동 클램프 회로는 주 스위치 오프시 변압기의 누설 인덕턴스의 저장된 에너지에 의한 전압 서지 발생을 막아준다. 출력 전압은 다음과 같이 나타낼 수 있다[2].

$$V_o = \frac{1}{1-D} n_T V_d \quad (4)$$

부스트 컨버터 동작 시 6개의 스위치  $S_1 \sim S_6$ 에 가해지는 클램프 커패시터 전압은 다음과 같이 정의된다.

$$V_c = \frac{1}{1-D} V_d \quad (5)$$

이와 같은 기동 방법으로 기존 컨버터와 비교해서 입력 전압 26V, 출력전압 380V로 유지되는 컨버터 실험을 하였다.

### 3. 실험 결과

#### 3.1 3상 전류형 능동 클램프 DC/DC 컨버터 구성

그림3은 3상 전류형 능동 클램프 DC/DC 컨버터 구성을 나타낸다. 컨버터 PCB 보드에는 DSP (TMS320F2808), FPGA EPM7128, 게이트 드라이버, DC/DC 컨버터, 입력 전류 및 출력 전압 센서, 트립 발생 부분, A/D 컨버터 입력 부분으로 구성되어 있고, 그 밖에 2차 권선이 감겨져 있는 입력 인덕터, 3상 변압기, 3상 정류기로 구성되어 있다.

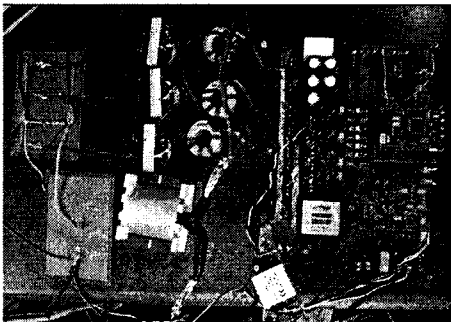


그림3. 3상 전류형 능동 클램프 DC/DC 컨버터 전체 구성 사진

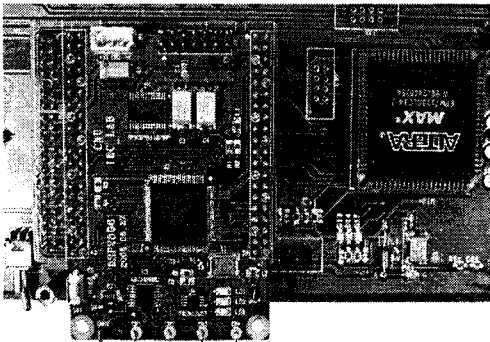


그림4. DSP2808과 FPGA

DSP프로세서인 TMS320F2808은 7개의 PWM을 이용하여 6개의 스위칭신호와 클램프 스위칭 신호를 만들어 FPGA로 신호를 보낸다. FPGA는 EPM7128을 사용하며 DSP로부터 입력 받은 7개의 PWM파형을 변형시켜 스위칭 파형을 만든다. 그림4는 실제 DSP2808과

FPGA를 보여준다.

#### 3.2 DC/DC 컨버터 정상상태 실험

기존 3상 전류형 능동 클램프 DC/DC 컨버터에서는 300uH용량의 입력 인덕터를 사용하였다. 그러나 효율이 낮고 전류포화의 가능성이 있어 120uH의 용량을 갖는 입력 인덕터로 교체하여 실험을 하였다.

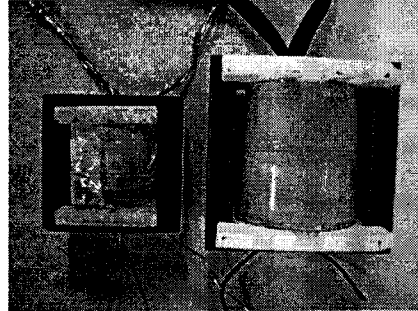


그림5. 300uH용량의 기존인덕터(좌), 120uH용량의 새로운 인덕터(우)

그림5에서 왼쪽에 있는 인덕터가 기존 인덕터이다. 기존 인덕터로는 500W부하에서 안정되고 일정하게 출력전압이 유지되나 600W 이상의 부하에서는 불안정하게 동작된다. 따라서 고부하에 안정되게 동작시키고자 새로운 인덕터를 개발하였다. 그림5에서 오른쪽에 있는 기존 인덕터에서 개선시킨 새로운 인덕터이다.

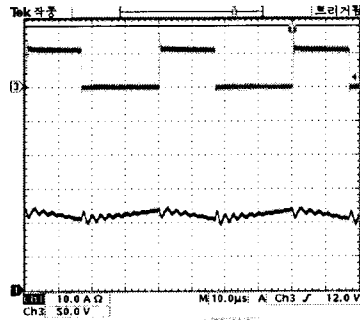


그림6. 기존 인덕터 500W 운전시  $V_{pN}$ 과 입력전류  $I_d$ 파형

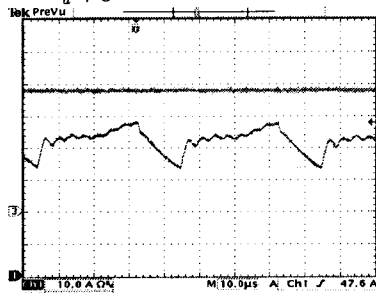


그림7. 새로운 인덕터 800W 운전시 출력전압  $V_o$ 와 입력전류  $I_d$  파형

그림6,7은 기존 인덕터와 새로운 인덕터 모두 정상상태에서 안정적인 전류 파형으로 스위칭  $DT_s$ 동안 전류가 증가하고  $(1-D)T_s$  동안에는 전류가 감소하는 전형적인 모습을 보인다.

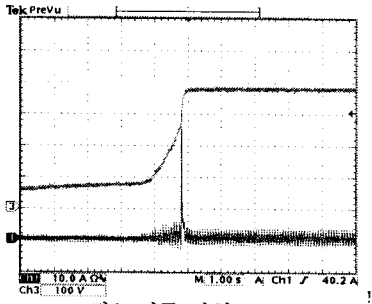


그림8. 기동 파형 ( $V_o, I_d$ )

그림8은 안정된 출력전압을 얻기 위해 입력 인덕터 2차 측에 의해 일부 출력전압이 확립되고 기동 시 지정해 준 최대 출력전압을 얻을 수 있다.

### 3.3 부하변동에 따른 출력전압, 온도 및 효율 분석

안정적인 동작이 확인된 3상 전류형 능동 클램프 DC/DC 컨버터에 두 개의 PI제어기를 적용하여 부하변동에 따른 출력전압을 분석하여 제어기의 성능을 확인해 보고 부하변동에서도 운전 중인 컨버터 상태가 적합한지 온도, 효율을 측정하고 분석하여 확인하였다.

표 1. 출력전압과 클램프 커패시터 전압

	Vout	Clamp 전압
100W	380.67	49
200W	383.3	51
300W	380.83	53
400W	377.23	57
500W	377.96	61
600W	376.51	65
700W	378.42	72
800W	378.38	79

표1은 기준 제어 출력전압 380V로 지정하고 실제 실험에서 부하변동에 따른 제어 된 출력전압 값과 클램프 커패시터 전압 값을 정리한 표이다. 출력전압은 기준 전압 380V에 약간의 오차가 발생하지만 안정되게 제어되고 있음을 나타낸다. 높은 부하일수록 스위치와 정류 다이오드에 의한 전압 오버슈트가 커지므로 이를 제한하는 클램프 커패시터의 전압 상승도 나타낸다.

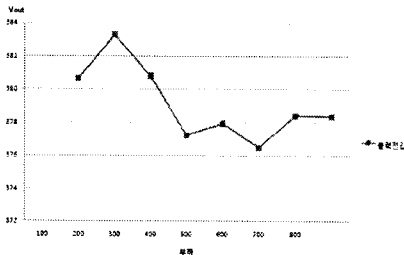


그림9. 각 부하별 출력전압 변동 그래프

그림9는 표1의 각 부하별 출력전압 수치를 그래프로 나타낸 것이다. 기준 제어 출력전압 380V로 부하변동에 따른 실제 출력전압은 약 +0.8%, -0.91% 이내로 제어되고 있음을 알 수 있다.

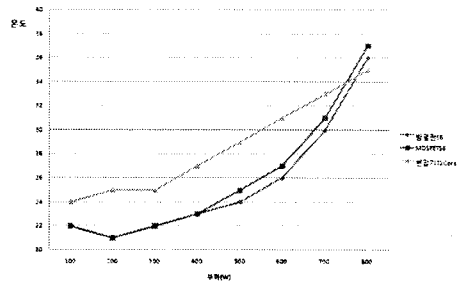


그림10. 온도실험 결과

컨버터 동작 시 부하용량이 증가함에 따라 컨버터 스위치, 인덕터, 변압기 온도도 증가한다. 그림10은 부하변동에 따른 온도변화를 측정된 것이며 컨버터와 연관된 소자, 장치들 중 온도변화가 심한 3가지를 나타낸 것이다. 소자, 주변 장치들의 온도가 급격히 상승한다면 스위치 단락이나 소손, 열손실 등을 유발할 수 있어 적절한 히트싱크가 필요하다.

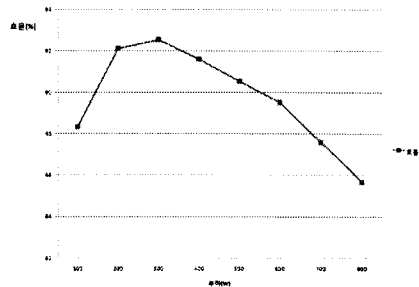


그림11. 부하별 효율 곡선

그림11은 정상 상태에서 부하변동에 따라 효율을 분석한 것이다. 높은 부하가 걸릴수록 효율이 떨어지는 경향이 보이며, 800W에서 86%의 효율을 보여준다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 연료전지용 3상 전류형 능동 클램프 DC/DC 컨버터의 부하변동에 따른 정상상태에서의 동작 상태를 구현하였다. 기존 DC-DC 컨버터의 한계용량을 개선해 보다 높은 부하용량에서도 정상상태에서의 안정된 동작을 하는 것을 실험을 통해 확인할 수 있었다. 컨버터 관련 소자 및 기기에 대한 온도, 효율 등을 측정 및 분석하여 큰 부하변동에서의 적합성 여부를 판단할 수 있었다. 기준 출력 전압에 대한 실제 출력전압은 약간의 오차가 발생했지만 한계용량 개선 후에도 제어기의 성능이 유효하다는 것이 증명되었다. 낮은 전압에서 높은 전압으로 변환하는 DC-DC 컨버터의 경우 기동 시 발생할 수 있는 과전류로 인한 스위치 소자 및 변압기 손상과 불안정한 출력전압에 대한 문제점이 플라이백방식으로 해결되면서 플라이백방식의 우수성을 확인하였다.

본 과제(결과물)는 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지자원인력양성사업의 연구결과입니다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 최순호, 충남대학교 전기공학과 석사논문, 2009년
- [2] 차한주, 최정완, Enjeti, A Three-Phase Current-Fed DC/DC Converter with Active Clamp for low DC Renewable Energy Sources, IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 23, No. 6, November 2008 pp 2784~2793